

Florian Dörner

**Methode zur Verifizierung und Validierung  
von Finite-Elemente-Berechnungen des  
Rad-Schiene-Normalkontakts**

**KIMA Schriftenreihe  
Band 15**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>x</b>
<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>xvii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xvii</b>
<b>Summary</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand von Wissenschaft und Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen der Kontaktmechanik . . . . .	3
2.1.1 Kontaktmechanik im Rahmen der Halbraumnäherung . . . . .	3
2.1.2 Allgemeine Kontaktmechanik . . . . .	4
2.1.3 Kontakt rauher Körper . . . . .	5
2.2 Hertzscher Kontakt . . . . .	6
2.2.1 Annahmen . . . . .	8
2.2.2 Mathematische Beschreibung . . . . .	8
2.3 Rollkontakt . . . . .	14
2.3.1 Grundlagen . . . . .	14
2.3.2 Einspielen . . . . .	15
2.3.3 Rollkontaktermüdung . . . . .	17
2.4 Finite-Elemente-Methode . . . . .	19
2.4.1 Grundlagen . . . . .	19
2.4.2 Grundlagen der FE-Kontaktberechnung . . . . .	27
2.4.3 FE-Berechnungen des Hertzschen Kontakts . . . . .	36
2.4.4 Verifizierung und Validierung von FE-Rechnungen . . . . .	37
2.5 Rad-Schiene-Kontakt . . . . .	41
2.5.1 Grundlagen . . . . .	41
2.5.2 Numerische Berechnungen . . . . .	42
2.5.3 Experimentelle Untersuchungen . . . . .	44
<b>3 Motivation</b>	<b>48</b>
<b>4 Verifizierung der Berechnung Hertzscher Kontakte mittels FEM</b>	<b>51</b>
4.1 Grundmodell der Verifizierung . . . . .	51
4.2 Auswertung der FE-Analysen . . . . .	51
4.2.1 Kontaktdruck . . . . .	52
4.2.2 Kontaktflächengröße und -radius . . . . .	52
4.2.3 Abstand zwischen den Kontaktkörpern . . . . .	53

4.3	Quasistatischer Kontakt . . . . .	54
4.3.1	FE-Modell stehende Kugel auf Platte . . . . .	54
4.3.2	Auswertepfade . . . . .	54
4.3.3	Konvergenzuntersuchung . . . . .	56
4.3.4	Vergleichsuntersuchung der Umsetzung der Kontaktbedingungen . . . . .	58
4.3.5	Vergleichsuntersuchung der Kontaktdiskretisierung . . . . .	59
4.3.6	Zusammenfassung . . . . .	60
4.4	Transienter Rollkontakt . . . . .	60
4.4.1	FE-Modell rollende Kugel auf Platte . . . . .	61
4.4.2	Transiente Vergleichsuntersuchung . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Modellbildung und Abschätzung des Modellierungsfehlers</b>	<b>64</b>
5.1	Physiskalisches Grundmodell des Rad-Schiene-Kontakts . . . . .	64
5.2	Geometrische Vereinfachungen . . . . .	65
5.2.1	Referenzmodell . . . . .	65
5.2.2	Radsatz- und Radausschnittmodelle . . . . .	69
5.2.3	Schienenmodelle . . . . .	71
5.2.4	Vereinfachung von Rad und Schiene . . . . .	73
5.2.5	Bewertung . . . . .	74
5.3	Mechanische Vereinfachungen . . . . .	75
5.3.1	Vereinfachung der Betrachtungsweise . . . . .	75
5.3.2	Einfluss der Kontaktflächenrauheit . . . . .	76
5.3.3	Rollwiderstand . . . . .	81
5.4	Konstitutive Vereinfachungen . . . . .	86
5.4.1	Linear-elastisches Materialmodell . . . . .	86
5.4.2	Elasto-plastische Materialmodelle . . . . .	86
5.4.3	Viskoelastische Materialmodelle . . . . .	88
5.4.4	Bewertung . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Abschätzung der Unsicherheiten</b>	<b>90</b>
6.1	Aufbau der Sensitivitätsuntersuchung . . . . .	91
6.1.1	Faktoren . . . . .	91
6.1.2	Ausgabeparameter . . . . .	93
6.1.3	Berechnungsmodell . . . . .	94
6.1.4	Verwendete CAE-Software . . . . .	95
6.1.5	Versuchsplan . . . . .	96
6.1.6	Modellparametrisierung . . . . .	97
6.1.7	Fehlerbetrachtung . . . . .	100
6.2	Ergebnisse . . . . .	102
6.2.1	Allgemeine Betrachtungen der Ausgabeparameter . . . . .	102
6.2.2	Abhängigkeiten der Ausgabeparameter untereinander . . . . .	102
6.2.3	Einfluss der Faktoren auf die Ausgabeparameter . . . . .	106
6.3	Bewertung . . . . .	111
<b>7</b>	<b>Bestimmung der Messabweichung von Druckmessfolien</b>	<b>113</b>
7.1	Untersuchung der Eignung der Folientypen . . . . .	113
7.1.1	Experimentelle Voruntersuchungen . . . . .	113
7.1.2	FE-Simulation der Druckmessfolie im Hertzschen Kontakt . . . . .	115
7.2	Untersuchung der systematischen Messabweichung der HHS-Folie . . . . .	118
7.3	Bewertung . . . . .	122

<b>8 Validierung</b>	<b>123</b>
8.1 Konzeptionelles Modell / Rad-Schiene-Prüfstand	123
8.2 Ausgabe- und Auswerteparameter	123
8.3 Experimente	125
8.3.1 Versuchsplan	125
8.3.2 Experimentelle Ergebnisse	126
8.4 Probabilistische FE-Simulationen	127
8.4.1 Mathematisches Modell	127
8.4.2 FE-Modell	129
8.4.3 Verwendete CAE-Software	130
8.4.4 Modellparametrisierung	130
8.4.5 Fehlerbetrachtung	131
8.4.6 Simulationsergebnisse	132
8.5 Vergleich der experimentellen und simulativen Ergebnisse	132
8.6 Bewertung	134
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
<b>A Effekt- und Wechselwirkungstabellen</b>	<b>137</b>
<b>Literatur</b>	<b>141</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen und Tagungsbeiträge</b>	<b>149</b>
<b>Betreute Studien- und Diplomarbeiten</b>	<b>150</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>151</b>